

## Thierry FOURCAUD

Directeur UMR AMAP, CIRAD

### ***L'UMR AMAP : plus de trente ans d'expérience de recherche interdisciplinaire en modélisation de l'architecture des plantes***

#### **Historique**

C'est à l'orée des années soixante-dix que Philippe de Reffye, ingénieur agronome passionné de mathématiques et d'informatique, eu l'idée de développer un modèle de simulation pour étudier la croissance, le développement et la production du caféier en Côte d'Ivoire (de Reffye, 1979). Ces travaux interdisciplinaires pionniers ont donné lieu aux premières maquettes tridimensionnelles de plantes. L'ambition initiale de ces recherches était de proposer des approches dites d'agronomie virtuelle, approches alternatives (et complémentaires) aux classiques expériences de terrain et modèles statistiques.

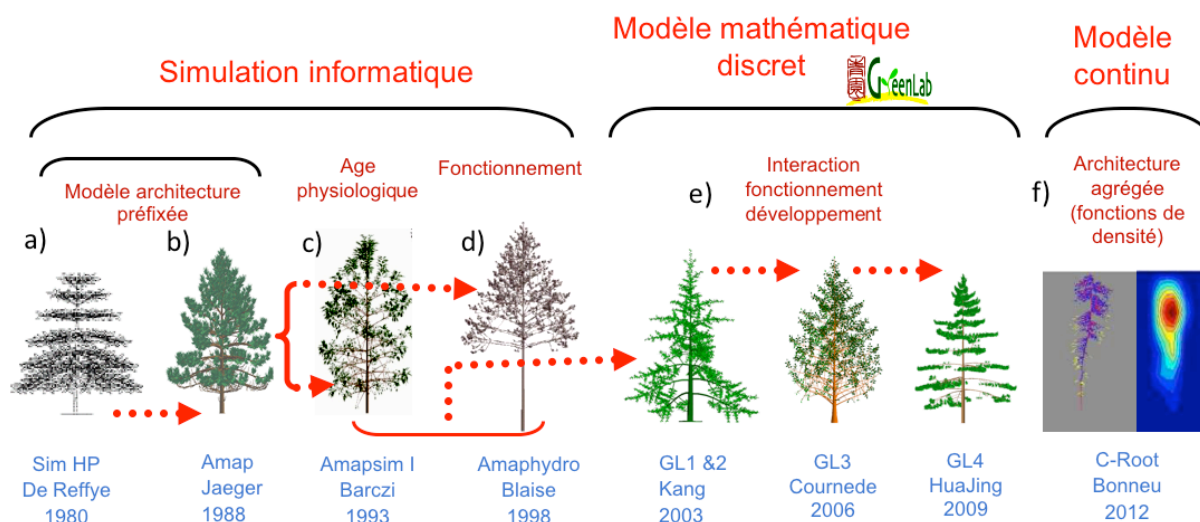
Quelques années avant, François Hallé, Professeur à l'Institut de Botanique de l'Université de Montpellier, et ses collaborateurs fournissaient des clefs de description et de classification de l'architecture des grands arbres, basées sur l'analyse morphologique des tiges (Hallé et Oldeman, 1970). La rencontre entre ces deux chercheurs fut une opportunité unique pour introduire des concepts génériques de modélisation de structures végétales complexes (Figure 1). C'est alors que Philippe de Reffye fédérait un groupe de chercheurs et d'ingénieurs, botanistes et informaticiens, et créait au GERDAT (aujourd'hui CIRAD, <http://www.cirad.fr>) le programme AMAP, Atelier de Modélisation de l'Architecture des Plantes. Ce programme associera très vite quelques chercheurs du département Forêts de l'INRA.

L'évolution rapide des systèmes d'exploitation informatiques et la mise à disposition de cartes graphiques de plus en plus performantes sur PC ont très vite permis des avancées considérables dans le domaine de la modélisation et de la simulation de l'architecture des plantes, avec en sortie une amélioration du réalisme visuel grâce à l'image de synthèse.

Ces nouvelles technologies ont contribué à élargir les champs d'applications de ces recherches dans les années 90, notamment en fournissant des outils de visualisation de plantes et de paysages pour l'aménagement du territoire ou encore les jeux vidéo.

L'intérêt grandissant pour ces approches d'analyse architecturale et les modèles de simulation de la croissance des plantes a contribué au rapprochement d'équipes de recherche montpelliéraines en botaniques, paléobotanique et écologie tropicale, pour constituer les nouveaux contours de ce qui allait devenir en 2001 l'UMR AMAP (<http://amap.cirad.fr>).

Cette UMR compte aujourd'hui cinq tutelles : le CIRAD, le CNRS, l'INRA, l'IRD et l'Université de Montpellier.



**Figure 1 :** différentes générations de modèles et simulateurs de croissance de plantes développés à AMAP : a) premier prototype filaire sous ordinateur HP ; b) modèle d'architecture préfixée, i.e. avec parcours récursif de l'arborescence pour la construction de la structure, et habillage par symboles graphiques ; c) introduction de l'âge physiologique dans le simulateur AMAPsim, permettant de regrouper des jeux de paramètres pour des structures similaires (Barczi et al., 2008) ; d) introduction de processus écophysiologiques (photosynthèse, allocation des assimilats, etc.) dans les modèles d'architecture (de Reffye et al., 1997); e) différentes versions du modèle Greenlab (Yan et al., 2004), formulation analytique discrète des bilans de biomasse avec allocation par pool d'organes basée sur les relations sources-puits ; f) modèle continu sous forme d'équation aux dérivées partielles pour la densité racinaires (Bonneu et al., 2012).

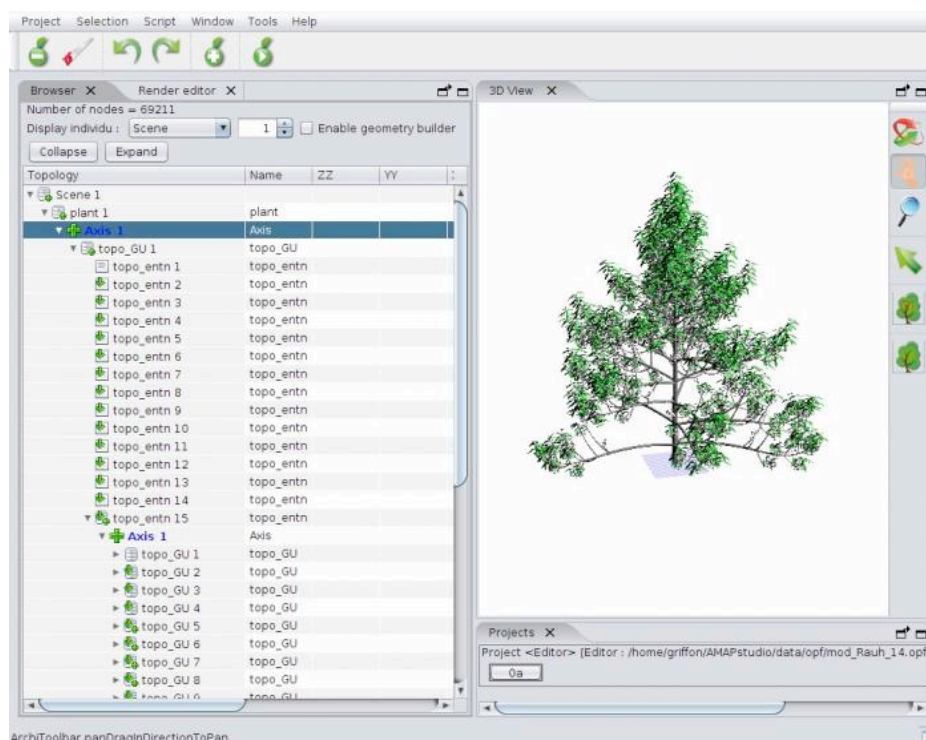
## AMAP aujourd'hui

Le nouveau projet de l'UMR AMAP, aujourd'hui « botanique et Modélisation de l'Architecture des Plantes et des végétations », vise à acquérir des connaissances fondamentales sur les dynamiques spatio-temporelles des plantes et des végétations en s'appuyant sur des approches mathématiques et informatiques de représentation, d'analyse, de modélisation et de simulation de ces systèmes complexes. Il s'agit *in fine* de prévoir la réponse des écosystèmes naturels ou cultivés aux forçages environnementaux, en termes de distribution/conservation des espèces et de la biodiversité, production des cultures agronomiques, stockage du carbone dans la biomasse végétale, protection de l'environnement et des services écosystémiques, avec un intérêt particulier pour les écosystèmes tropicaux.

Ces travaux s'inscrivent dans trois axes de recherche qui concernent :

- 1- la biodiversité végétale actuelle et passée : il s'agit de caractériser la diversité des formes et des fonctions sous l'influence de facteurs écologiques et physiologiques, la diversité des taxons en fonction des modalités d'assemblage et d'interaction interspécifique, ou encore la diversité phylogénétique en fonction d'hypothèses évolutives, macro-écologiques et biogéographiques ;
- 2- la biomasse et la production des plantes et des végétations : il s'agit d'analyser et modéliser les relations structure-fonctions au sein de la plante pour en particulier quantifier la production de photosynthétats et leur répartition dans les différents compartiments végétatifs. Ces modèles structure-fonctions sont intégrés à plus grande échelle afin d'étudier les interactions plantes-plantes et plantes-environnement et prédire la dynamique et le fonctionnement de la végétation ;
- 3- la modélisation du monde végétal : il s'agit de développer des formalismes mathématiques adaptés (équations aux dérivées partielles, modèles discrets stochastiques, etc.) et d'analyser les propriétés émergentes de ces modèles pour répondre aux questions thématiques portées dans les axes ci-dessus. Les travaux menés dans cet axe puissent leurs sources dans ces questionnements en sciences du vivant et ont pour vocation à être publiés dans des revues de mathématiques appliquées ou d'informatique théorique.

Nous présentons ci-dessous quelques aspects des approches interdisciplinaires développées pour répondre à ces grandes questions.



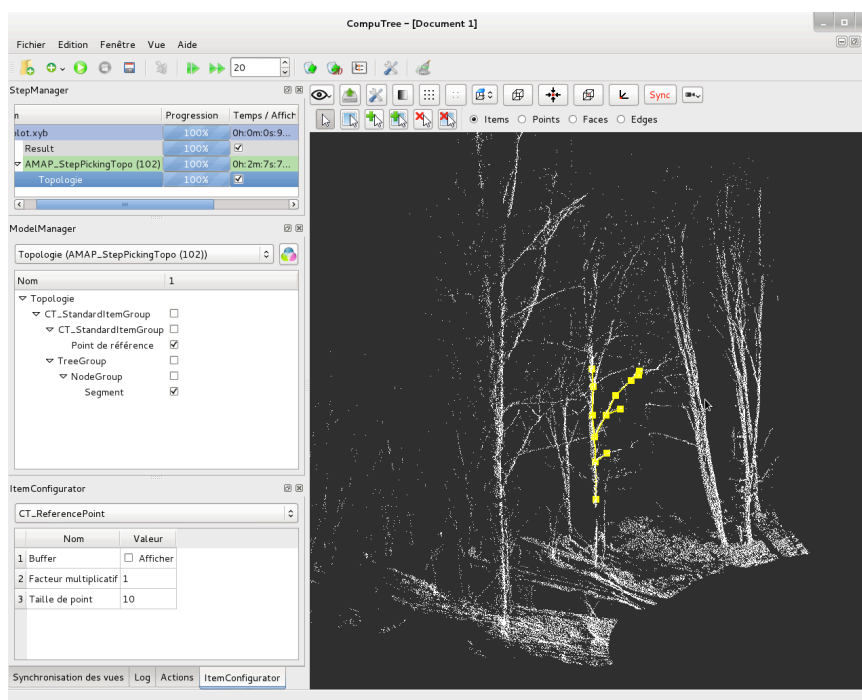
**Figure 2 :** codage et visualisation d'architecture d'arbre sous la composante Xplo d'AMAPstudio.

### L'approche architecturale et la modélisation structure-fonctions de la croissance des plantes

L'approche architecturale vise à reconstruire de façon rétroactive la croissance et le développement d'une plante à partir de la connaissance de son mode d'organisation (typologie des axes, processus de métamorphose, liens entre les différentes échelles d'observation, i.e. plante, axes, unités de croissance, entrenoeuds, etc.) et de l'analyse de marqueurs morphologiques traçant la présence passée de feuilles et de tiges (Barthélémy et Caraglio, 2007). Ce travail est rendu possible grâce au développement d'un formalisme de représentation pour le codage informatique de la structure ramifiée. Ce formalisme repose sur l'utilisation de graphes arborescents multi-échelles (MTG) développés à AMAP et devenus un standard en modélisation de l'architecture végétale (Godin et Caraglio, 1998). La plateforme logicielle AMAPstudio (<http://amapstudio.cirad.fr>) permet le codage, la représentation 3D et le parcours dans l'architecture de plantes à partir de ces graphes (Figure 2). L'extraction et l'analyse des données topologiques (relations porteurs-portés) et géométriques (longueurs, diamètres de tiges, angles d'insertion des rameaux, etc.) permettent la construction de modèles décrivant l'évolution dans le temps des structures 3D observée et leur variabilité. Ces modèles de branchaison sont décrits sous la forme de probabilités conditionnelles (chaînes de Markov) et ont fait l'objet de nombreuses publications (voir Guédon et al., 2007 par exemple). Ces concepts ont été implémentés dans un simulateur d'architecture de plante appelé AMAPsim (Barczi et al., 2008).

Plus récemment, des modèles dits FSPM (Functional Structural Plant Models) (Fourcaud et al., 2008), ont été développés pour associer les principaux processus fonctionnels aux modèles d'architecture. L'objectif visé est de mieux prendre en compte l'effet des facteurs environnementaux et les stratégies d'allocation de biomasse au sein de la plante dans les modèles de croissance. Le modèle Greenlab, initié par Philippe de Reffye à AMAP dans les années 90, et dont les développements ont été poursuivis en collaboration avec des équipes chinoises dans le cadre du LIAMA, Laboratoire

franco-Chinois d'Informatique d'Automatique et de Mathématiques Appliquées (<http://liama.ia.ac.cn>), fait partie de cette famille des FSPM (Yan et al., 2004). Il se démarque cependant des approches de reconstruction par des grammaires informatiques (exemple L-Systems) du fait de son expression purement analytique (sous forme d'équations de récurrence fournissant les relations sources-puits de biomasse dans la plante) qui permet des coûts de calcul beaucoup plus performants. L'inversion du modèle Greenlab offre de plus un outil pour quantifier les forces puits des différents organes, données qui ne sont pas directement mesurables.



**Figure 3 :** représentation de données Lidar sous la plateforme CompuTree.

### Estimer et prédire la biomasse stockée dans les forêts tropicales

Dans un contexte de changement climatique lié en particulier aux fortes émissions de CO<sub>2</sub> émanant des activités humaines, l'estimation des stocks de carbone organique fixés dans les forêts et la prédiction de leur évolution sont devenues des questions essentielles. Les forêts tropicales constituent un des principaux puits de carbone sur la planète, mais les modèles prédictifs développés jusqu'à présent prennent encore insuffisamment en compte les dynamiques de ces systèmes hétérogènes très complexes, en particulier en terme de composition spécifique et de structure 3D. Pour pallier ces lacunes, AMAP s'attache à développer des approches méthodologiques intégratives s'appuyant sur la télédétection, l'observation de terrain et la modélisation. La télédétection (intégrant ici les technologies radar, optiques et lidar, voir Figure 3) permet l'acquisition des données forestières utilisées pour construire, calibrer et valider les modèles 3D à grande échelle, mais aussi pour la stratification des échantillons de terrain. L'observation de terrain (composition spécifique, caractérisation des structures d'arbres, pesées, etc.) aide à interpréter les images de télédétection et à paramétrer et valider les modèles 3D aux échelles individuelle et parcellaire. Les modèles de dynamique spatio-temporelle d'arbres visent à interpréter les données de télédétection par inversion et *in fine* à prédire l'évolution des systèmes étudiés. L'intégration des approches architecturales décrites plus haut permet d'optimiser l'échantillonnage et d'affiner les modèles d'allocation de carbone à l'échelle de l'arbre en prenant par exemple mieux en compte la présence de grosses structures issues de complexes réitérés (i.e. reproduisant dans la couronne une unité architecturale caractéristique de l'arbre au stade juvénile).



**Figure 4 :** Application mobile Pl@ntNet pour l'identification des plantes.

### Alimenter les bases de données floristiques pour le suivi de la biodiversité végétale

L'érosion de la biodiversité, en particulier liée aux changements globaux, est une préoccupation planétaire majeure. Définir des cartographies des aires de distribution des espèces végétales aux échelles régionales et inter-régionales, et développer des modèles prédictifs de leur évolution spatio-temporelle est donc devenu un enjeu fort. Cet enjeu se heurte cependant à un manque de données d'inventaire, essentiellement lié à la capacité de mobiliser un nombre suffisant d'experts botanistes pour récolter ces données à très large échelle, mais aussi bien souvent à l'absence de flores de référence permettant d'accéder à une liste standard de noms d'espèces.

C'est la raison pour laquelle des chercheurs d'AMAP ont eu l'idée de développer une plateforme collaborative de collecte, d'agrégation et de partage de données sur les plantes. Ce projet, appelé Pl@ntNet ([http://www.plantnet-](http://www.plantnet-project.org)

[project.org](http://www.plantnet-project.org)) et porté par un consortium associant Cirad, INRA, Inria, IRD et Tela Botanica, a vu le jour dans le cadre d'un financement Agropolis Fondation (<http://www.agropolis-fondation.fr>). La démarche innovante mise alors en place pour alimenter et gérer ces grandes bases de données floristiques est basée sur une approche de sciences participatives et le développement d'outils informatiques dédiés. Cette approche implique la contribution du grand public pour l'acquisition de photos numériques d'organes de plantes, le développement et l'utilisation d'outils d'identification par analyse d'images et la mobilisation de réseaux de botanistes amateurs pour la validation des résultats retournés avant leur intégration dans le corpus de données d'images numériques.

L'élément phare et le plus visible de la plateforme Pl@ntNet est l'application d'identification des plantes Pl@ntNet-mobile (Figure 4) (<http://m.plantnet-project.org>) disponible sur smartphones mais aussi sur un site web dédié. Cette application fait appel à des technologies de pointe pour la fouille de données massives d'images. Elle est aujourd'hui utilisée par plus de 2 millions de personnes dans environ 150 pays, avec une fourchette de 10000 à 15000 utilisateurs par jour en 2016. Cette mobilisation a permis d'alimenter massivement les bases de données qui comptent à cette date près de 500000 images de plantes (dont 240000 validées en Europe, 68000 dans l'Océan Indien, 45000 en Amérique du Sud et 130000 en Afrique du Nord), représentant plus de 10000 espèces (6100 en Europe, 1100 dans l'Océan Indien, 900 en Amérique du Sud et 2700 en Afrique du Nord).

### Références

- Barczi J-F, Rey H, Caraglio Y, De Reffye P, Barthelemy D, Dong QX, Fourcaud T (2008) AmapSim: a structural whole-plant simulator based on botanical knowledge and designed to host external functional models. *Annals of Botany* 101: 1125-1138
- Barthélémy D, Caraglio Y (2007) Plant architecture: A dynamic, multilevel and comprehensive approach to plant form, structure and ontogeny. *Annals of Botany* 99: 375-407.
- Bonneu A, Dumont Y, Rey H, Jourdan C, Fourcaud T (2012) A minimal continuous model for simulating root growth and development of plant root systems. *Plant and Soil* 354: 211-227
- de Reffye P (1979) Modélisation de l'architecture des arbres par des processus stochastiques. Simulation spatiale des modèles tropicaux sous l'effet de la pesanteur. Application au *Coffea Robusta*. Th. Doct. État, Université Paris-Sud, Orsay.
- de Reffye P, Fourcaud T, Blaise F, Barthélémy D, Houllier F (1997) A functional model of tree growth and tree architecture. *Silva Fennica* 31: 297-311

- Fourcaud T, Zhang XP, Stokes A, Lambers H, Koerner C (2008) Plant growth modelling and applications: The increasing importance of plant architecture in growth models. *Annals of Botany* 101: 1053-1063.
- Godin C, Caraglio Y (1998) A multiscale model of plant topological structures. *Journal of Theoretical Biology* 191: 1-46.
- Guédon Y, Caraglio Y, Heuret P, Lebarbier E, Meredieu C (2007) Analyzing growth components in trees. *Journal of Theoretical Biology* 248: 418-447
- Hallé F, Oldeman RAA (1970) *Essai sur l'architecture et la dynamique de croissance des arbres tropicaux*. Masson, Paris
- Yan H-P, Kang MZ, De Reffye P, Dingkuhn M (2004) A dynamic, architectural plant model simulating resource-dependent growth. *Annals of Botany* 93: 591-602.